УДК 544.32

ФОТОЛИЗ АЗИДА СВИНЦА В КОНТАКТЕ С ОКСИДОМ МЕДИ (I)

Э.П. Суровой, Л.Н. Бугерко, С.В. Расматова

ГОУ ВПО «Кемеровский государственный университет»
E-mail: epsur@kemsu.ru

Установлено, что наряду с уменьшением скорости фотолиза и фототока в области собственного поглощения азида свинца, добавка оксида меди расширяет область спектральной чувствительности, а предварительная обработка светом (λ=365 нм) увеличивает скорость фотолиза. В результате анализа результатов измерений вольтамперных характеристик, контактной разности потенциалов, контактной фото-ЭДС построена диаграмма энергетических зон и предложена модель фотолиза систем PbN_6(Ам)–Cu_2O, включающая стадии генерации, рекомбинации, перераспределения неравновесных носителей в контактном поле, формирование микрогетерогенных систем PbN_6(Ам)–Pb (продукт фотолиза), а также образование конечных продуктов фотолиза.

Интенсивное развитие исследований гетерогенных систем светочувствительная соль – металл (полупроводник) с середины 70-х годов прошлого столетия стимулируется стремлением научного сообщества к разработке методов и средств более рационального использования тех ресурсов, которые еще остались на нашей планете [1, 2]. В качестве основных, можно выделить две основные причины интереса к исследованиям в указанной области. Во-первых, для обеспечения многих процессов используется свет солнечного диапазона, а в некоторых практически важных фотостимулированных реакциях утилизация подведенной энергии достигает нескольких десятков процентов. Во-вторых, важными прикладными направлениями исследований являются: разработка принципиально новых материалов для создания терморегулирующих и теплоотражающих покрытий, позволяющих экономить до 70 % тепловой энергии, пигментов в красящих составах, элементов полупроводниковых устройств и др., для записи, хранения и преобразования информации передаваемой тепловым, оптическим, механическим и другим путем [1–7].

Изучение темновых и фотопроцессов в гетеросистемах на основе азида свинца [3, 8–12], один из компонентов которых – азид свинца, сочетая достоинства модельных соединений (имеет относительно несложный состав и структуру, простой состав конечных продуктов фоторазложения, обладает достаточной фоточувствительностью и значительным внутренним фотоэффектом), используется в технике – актуально как в научном, так и практическом отношении.

В настоящем сообщении приведены результаты работы, направленной на исследование влияния добавки оксида меди (1) на кинетические и спектральные закономерности фотолиза азида свинца при давлении $1\cdot10^{-5}$ Па и на выяснение причин, вызывающих наблюдаемые изменения добавкой Cu_2O фотохимической и фотоэлектрической чувствительности азида свинца.

Объекты и методы исследования

Азид свинца (марки Ам) – PbN_6(Ам) синтезировали методом двухструйной кристаллизации медленным (в течение 60 мин) сливанием «струя в струю» водных 0,2н растворов дважды перекристаллизованного технического азида натрия и нитрата свинца (квалификации х.ч.) при pH 3. Образцы для исследований готовили тщательным перемешиванием (в сухом состоянии и в этиловом спирте) соответствующих навесок азида свинца и оксида меди (1) с последующей сушкой и прессованием при давлении $4\cdot10^3$ кг·см$^{-2}$ таблеток диаметром 1 см. Кроме того, оксид меди (1) наносили методом термического испарения при давлении $1\cdot10^{-3}$ Па), используя вакуумный универсальный пост ВУП-5М, на освещаемую поверхность таблеток PbN_6(Ам). При сопоставлении результатов и построении кривых спектрального распределения скорости фотолиза ($V_ф$), фототока ($i_ф$) и фото-ЭДС ($U_ф$) пропускание света через Cu_2O учитывалось. Измерения $V_ф$, $i_ф$ и $U_ф$ образцов осуществляли при давлении ~10^{-5} Па. В качестве датчика при измерении $V_ф$ использовали лампу РМО-4С омегатронного масс-спектрометра ИП-

ДО-1, настроенного на частоту регистрации молекулярного азота [13]. Измерения $i_ф$ и $U_ф$ проводили на установке, включающей электрометрический вольтметр В7-30 [12]. Спектры диффузного отражения (ДО) до и после облучения образцов измеряли при давлении ~10^{-4} Па, используя устройство [14], на спектрофотометре СФ-4А с приставкой ПДО-1 и при давлении 101,3 кПа на спектрофотометре Specord-M40 с приставкой на отражение 8°/d [15]. В качестве источников излучения применяли ртутную (ДРТ-250) и ксеноновую (ДКсШ-1000) лампы. Для выделения требуемого участка спектра использовали монохроматоры МДР-2 и SPM-2, светофильтры. Актинометрию источников света проводили при помощи радиационного термоэлемента РТ-0589. Контактную разность потенциалов между PbN_6(Ам), Cu_2O и электродом сравнения из платины измеряли, используя модифицированный метод Кельвина [9]. Топографию твердофазных продуктов фотолиза PbN_6(Ам) и PbN_6(Ам)–Cu_2O изучали с помощью метода угольных реплик с извлечением на просвечивающем микроскопе УЭМВ-1000.

Результаты и обсуждение

В результате сопоставления кинетических кривых $V_ф$ (рис. 1), измеренных при воздействии на образцы PbN_6 (Ам) и PbN_6(Ам)–Cu_2O света из области собственного поглощения азида свинца, было установлено, что создание систем, наряду с уменьшением добавкой Cu_2O $V_ф$ PbN_6(Ам), не приводит к изменению формы кинетических кривых.

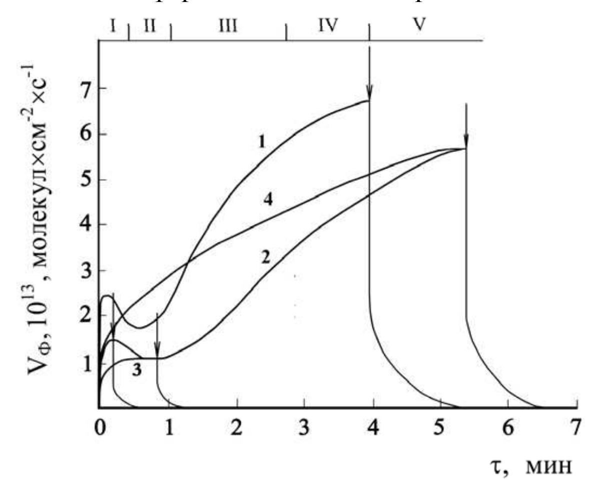


Рис. 1. *Кинетические кривые скорости фотолиза PbN_6(Ам) (1), систем PbN_6(Ам)–Cu_2O (2–4) до (1,2) и после прерывания света для систем PbN_6(Ам)–Cu_2O на II (3), IV (4) участках. $I=2\cdot10^{15}$ квант·см$^{-2}$·с$^{-1}$, $\lambda=365$ нм. Стрелками обозначены моменты прерывания света*

В полях интенсивного облучения ($I>1\cdot10^{14}$ квант·см$^{-2}$·с$^{-1}$) систем PbN_6(Ам)–Cu_2O проявляются характерные для индивидуального азида свинца [13] участки: I – нестационарный, II – стационарный, III – возрастания, IV – насыщения. Снижение интенсивности падающего света ($I<1\cdot10^{14}$ квант·см$^{-2}$·с$^{-1}$) приводит к уменьшению $V_ф$, а также к увеличению продолжительности участков кинетических кривых $V_ф$. При больших концентрациях добавок (более 30 %) имеет место затемнение (экранирование) части поверхности азида свинца. Продолжительное (более одного месяца) хранение исследуемых систем в «атмосферных» условиях, предварительные тепловая и световая обработки, а также обработка азида свинца (до создания систем) в восстановительной среде уменьшают (вплоть до полного исчезновения) начальный максимум на кинетических кривых $V_ф$. В качестве примера на рис. 1 (кривые 2–4) приведены результаты исследований влияния предварительной обработки образцов PbN_6(Ам)–Cu_2O светом из области собственного поглощения азида свинца. Видно (рис. 1, кривая 3), что повторное (после прерывания света на II участке) облучение образцов не приводит к заметному изменению значений $V_ф$ на II, III и IV участках кинетических кривых $V_ф$. После предварительной световой обработки образцов до IV участка $V_ф$ монотонно возрастает до постоянного значения и соответствует значениям $V_ф$ на участке IV не обработанных светом образцов (рис. 1, кривая 4). Более продолжительное освещение образцов приводит к снижению $V_ф$. В результате электронно-микроскопических и спектрофотометрических исследований было установлено, что наблюдаемое уменьшение $V_ф$ связано с затенением поверхности образцов металлом (продуктом фотолиза) и, как следствие, с уменьшением числа поглощенных системой квантов света [13]. Последующая обработка предварительно экспонированных систем в окислительной среде, хранение в «атмосферных» условиях и при давлении $1\cdot10^{-1}$ Па в течение одного месяца приводит к частичному восстановлению формы кинетических кривых $V_ф$.

После прекращения экспонирования образцов на разных участках кинетических кривых $V_ф$ наблюдается участок (V) постгазовыделения (рис. 1). Видно, что кривые постгазовыделения состоят из двух участков – “быстрого” и “медленного”. С увеличением времени экспонирования и интенсивности падающего света продолжительность постгазовыделения возрастает за счет увеличения временного интервала «медленной» составляющей, а с понижением температуры участок постгазовыделения сокращается за счет уменьшения временного интервала «медленной» составляющей. Установлено, что при 293 К анаморфозы постгазовыделения для PbN_6(Ам)–Cu_2O, построенные в координатах $\ln C_{N_2}=f(\tau)$, независимо от времени предварительного экспонирования, интенсивности падающего света – линейны. В табл. 1 приведены константы скорости (k) процесса ответственного за постгазовыделение рассчитанные по кинетическим кривым после прерывания освещения на I, II и IV участках кинетической кривой $V_ф$ исследуемых образцов.

На рис. 2 приведены спектральные распределения $V_ф$ систем PbN_6(Ам)–Cu_2O при облучении их светом равной интенсивности при 293 К, построенные по стационарным участкам (II) кинетических кривых $V_ф$. Видно, что создание систем

PbN_6(Ам)–Cu_2O, наряду с уменьшением $V_ф$ в собственной области поглощения PbN_6(Ам), приводит к появлению заметного фоторазложения в длинноволновой области спектра, соответствующей области поглощения и фотоэлектрической чувствительности Cu_2O. Для выяснения причин, вызывающих наблюдаемые изменения добавкой Cu_2O $V_ф$ PbN_6(Ам) был выполнен комплекс измерений вольт-амперных характеристик (ВАХ), $i_ф$ и $U_ф$. В результате измерений ВАХ в диапазоне внешних напряжений –3...+3 В было установлено, что эффект «выпрямления» отсутствует. В спектральных областях, отвечающих областям поглощения и фотоэлектрической чувствительности контактирующих партнеров, были обнаружены заметные $i_ф$ и $U_ф$ (рис. 2). Видно, что кривые спектрального распределения $U_ф$, $V_ф$ и $i_ф$ коррелируют, а знак $U_ф$ отрицательный со стороны PbN_6(Ам).

Таблица 1. *Константы скорости (k, $с^{-1}$) процесса ответственного за постгазовыделение (участок V) после прерывания света на I, II и IV участках кинетической кривой $V_ф$*

Образец	I	II	IV
PbN_6(Ам)–Cu_2O	$(4,40\pm0,05)\cdot10^{-2}$	$(4,20\pm0,02)\cdot10^{-2}$	$(2,40\pm0,02)\cdot10^{-3}$

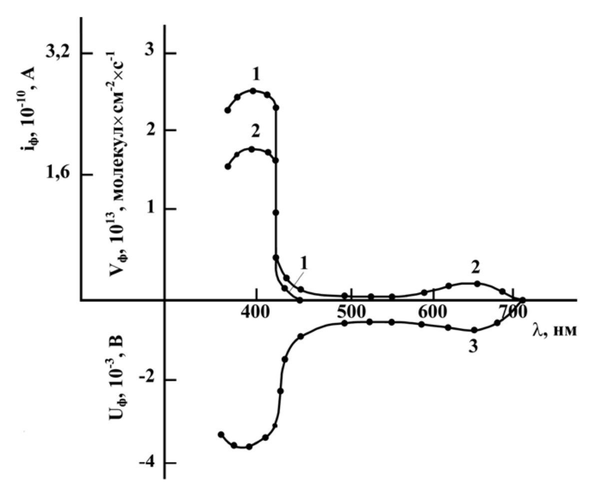


Рис. 2. *Спектральные распределения скорости фотолиза (1, 2), фототока (1, 2) и фото-ЭДС (3) PbN_6(Ам) (1), систем PbN_6(Ам)–Cu_2O (2,3). $I=3,17\cdot10^{15}$ квант·см$^{-2}$·с$^{-1}$*

Закономерности формирования твёрдофазного продукта фотолиза систем PbN_6(Ам)–Cu_2O изучали путем измерения ДО образцов до, в процессе и после обработки их светом из области собственного поглощения азида свинца в интервале интенсивностей падающего света $7,95\cdot10^{14}...5,56\cdot10^{15}$ квант·см$^{-2}$·с$^{-1}$. Длинноволновый край ДО PbN_6(Ам) [13] и PbN_6(Ам)–Cu_2O составляет λ=400 нм (рис. 3). При временах облучения, соответствующих реализации I и II участков на кинетических кривых $V_ф$ наряду с уменьшением ДО в диапазоне 400...800 нм на спектральных кривых ДО появляется максимум при $\lambda\approx$400...450 нм. Дальнейшее увеличение времени световой обработки (до участка IV) приводит к уширению полосы и смещению максимума в длинноволновую область спектра. Хранение облученных образцов в течение 24 ч при 293 К и P=101,3 кПа приводит к частичному восстановлению ДО образцов в области $\lambda\geq$400 нм. Были сопоставлены кинетические кривые зависимостей изменения концентрации фотолитического металла (C_{Me}), рассчитанные по результатам измерений $V_ф$ при различных интенсивностях падающего света, со значениями площадей (S), соответствующих изменению ДО систем PbN_6(Ам)–Cu_2O в процессе облучения. Установленное совпадение зависимостей, а также результаты представленные в [13] свидетельствуют о том, что наблюдаемые в результате облучения образцов изменения на спектральных кривых ДО систем PbN_6(Ам)–Cu_2O обусловлены образованием свинца (продукта фотолиза азида свинца). Причем, твердофазный (свинец) и газообразный (азот) продукты фотолиза систем PbN_6(Ам)–Cu_2O образуются в стехиометрическом соотношении, в основном на поверхности образцов. В табл. 2 приведены константы $V_ф$ PbN_6(Ам) и систем PbN_6(Ам)–Cd, оцененные по тангенсу угла наклона зависимостей $\ln S=f(\tau)$, $\ln C_{Me}=f(\tau)$. Из табл. 2 следует, что константы $V_ф$ азида свинца и систем PbN_6(Ам)–Cd практически совпадают.

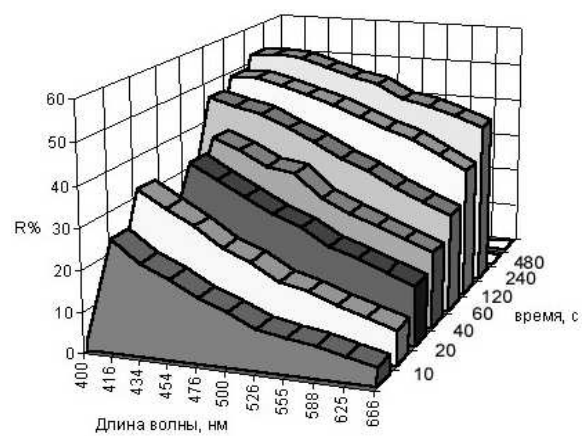


Рис. 3. *Изменение отражательной способности систем PbN_6(Ам)–Cu_2O в зависимости от времени облучения светом: 1) 10, 2) 20, 3) 40, 4) 60, 5) 120, 6) 240, 7) 480 с. λ=365 нм, $I=3,17\cdot10^{15}$ квант·см$^{-2}$·с$^{-1}$*

Таблица 2. *Константы скорости фотолиза, рассчитанные по кинетическим кривым скорости фотолиза ($k_{1ф}$) и спектрам диффузного отражения ($k_{1ДО}$), $I=3,17\cdot10^{15}$ квант·см$^{-2}$·с$^{-1}$*

Образец	$k_{1ф}$, с$^{-1}$	$k_{1ДО}$, с$^{-1}$
PbN_6(Ам)	$(5,90\pm0,47)\cdot10^{-2}$	$(5,80\pm0,48)\cdot10^{-2}$
PbN_6(Ам)–Cu_2O	$(5,80\pm0,50)\cdot10^{-2}$	$(5,30\pm0,48)\cdot10^{-2}$

Представленные в настоящей работе и ранее [4–10] результаты свидетельствуют о контактной, фотоэлектрической природе наблюдаемых эффектов изменения добавкой Cu_2O $V_ф$ азида свинца в разных спектральных областях. Это, прежде всего, следует из установленных экспериментальных фактов:

- корреляции кривых спектрального распределения $V_ф$, $i_ф$ и $U_ф$;

- корреляции кривых спектрального распределения $V_ф$, $i_ф$ и $U_ф$ со спектрами поглощения и кривыми спектрального распределения $i_ф$ PbN_6(Ам) и Cu_2O;
- формирование $U_ф$ прямо свидетельствует о разделении неравновесных носителей заряда на контакте при освещении.

Фотохимические проявления фотоэлектрических процессов в системах PbN_6(Ам)–Cu_2O могут быть вызваны перераспределением под действием контактного поля электрон – дырочных пар, генерированных светом в области пространственного заряда (ОПЗ) контактирующих партнеров, которое приводит к тому, что добавка Cu_2O может проявить себя донором или акцептором неравновесных носителей заряда по отношению к азиду свинца. Согласно соотношениям термоэлектронных работ выхода контактирующих партнеров (табл. 3) [9], следовало ожидать эффектов «выпрямления» на ВАХ, а также одинакового по всему спектру, но различного (в зависимости от условий проведения эксперимента) знака $U_ф$.

Таблица 3. *Контактная разность потенциалов (В) между PbN_6(Ам), Cu_2O и относительным платиновым электродом при 293 К*

Препарат	P=1·10^5 Па	P=1·10^{-5} Па
PbN_6(Ам)	+0,28	+0,46
Cu_2O	+0,31	+0,20

Однако, как показали исследования, независимо от соотношений термоэлектронных работ выхода контактирующих партнеров на ВАХ отсутствуют заметные эффекты «выпрямления», а знак $U_ф$ со стороны PbN_6(Ам) измеренный в атмосферных условиях и в вакууме для систем PbN_6(Ам)–Cu_2O – отрицательный (рис. 2). Отмеченные факты, а также результаты измерений контактной разности потенциалов (табл. 3) [9], конденсаторной фото-ЭДС [11], $V_ф$, $i_ф$ и $U_ф$ систем PbN_6(Ам)–металл (продукт фотолиза) [13] свидетельствуют о значительной концентрации и решающей роли собственных поверхностных электронных состояний ($Т_П^-$, $Т_К^+$) у азида свинца и поверхностных электронных состояний контакта ($П_П^-$, $П_К^+$) азида свинца с оксидом меди (1) в процессах перераспределения носителей заряда на контактах в темноте и при их облучении. При создании контактов PbN_6(Ам) с Cu_2O происходит процесс обмена равновесными носителями зарядов до тех пор, пока в системах не установится термодинамическое равновесие. Характер приповерхностных изгибов зон у PbN_6(Ам) и контактирующего с ним Cu_2O, определяющий вид донорно-акцепторных воздействий полупроводника на фотолиз PbN_6(Ам), приведен на рис. 4.

При воздействии на системы PbN_6(Ам)–Cu_2O света из области собственного поглощения азида свинца имеет место интенсивная генерация электрон-дырочных пар в азиде свинца и полупроводнике (рис. 4, переходы 1, 2).

$$N_3^- \to p + e$$

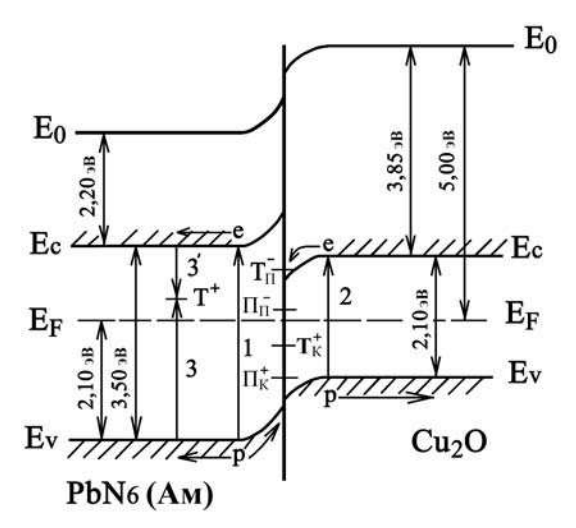


Рис. 4. *Диаграмма энергетических зон системы PbN_6(Ам)–Cu_2O. E_V – уровень потолка валентной зоны, E_C – уровень дна зоны проводимости, E_F – уровень Ферми, E_0 – уровень вакуума, T^+ – центр рекомбинации*

Так как квантовый выход фотолиза систем PbN_6(Ам)–Cu_2O при экспозиции $\tau \leq 60$ с 0,002...0,010, то часть генерированных носителей заряда рекомбинирует (рис. 4, переходы 3)

$$T^+ + e \to T^0 + p \to T^+,$$

где T^+ – центр рекомбинации. Генерируемые в ОПЗ азида свинца и оксида меди (1) пары неравновесных носителей заряда перераспределяются в контактном поле, сформированном из-за несоответствия работ выхода контактирующих партнеров (табл. 3), наличия $Т_П^-$, $Т_К^+$ и $П_П^-$, $П_К^+$. Неравновесные дырки из валентной зоны азида свинца и неравновесные электроны из зоны проводимости Cu_2O переходят на уровни $Т_П^-$, $Т_К^+$.

Осевшие на уровнях $П_П^-$, $П_К^+$ электроны и дырки могут рекомбинировать или обмениваться с близлежащими зонами полупроводника и азида свинца.

При экспонировании систем PbN_6(Ам)–Cu_2O светом из области поглощения Cu_2O имеет место интенсивная генерация электрон – дырочных пар в полупроводнике (рис. 4, переход 2). Генерированные в ОПЗ Cu_2O неравновесные носители заряда перераспределяются в контактном поле с переходом электронов из зоны проводимости полупроводника на уровни $Т_П^-$, $Т_К^+$ и $П_П^-$, $П_К^+$. Реализуемый знак $U_ф$ (рис. 2) со стороны азида свинца для систем PbN_6(Ам)–Cu_2O свидетельствует о возможности осуществления рассматриваемых переходов. Одновременно с отмеченными переходами, которые приводят к формированию $U_ф$ (и смещению энергетических уровней у контактирующих партнеров) имеют место потоки равновесных носителей заряда. В итоге, концентрация дырок в ОПЗ азида свинца (в контакте с Cu_2O) будет изменяться по сравнению с концентрацией их в индивидуальном азиде. Результирующее изменение концентрации дырок в ОПЗ азида свинца приведет к соответ-

ствующему понижению $i_ф$ и $V_ф$ в собственной области поглощения азида (рис. 1, 2) и появлению $i_ф$ и фотолиза в длинноволновой области спектра (рис. 2), соответствующей области поглощения и фотоэлектрической чувствительности Cu_2O, по принимаемым для фотолиза азидов тяжелых металлов реакциям образования азота:

$$p+V_K^- \to V_K^0+p \to V_K^+ \to 3N_2+2V_A^+ + V_K^-,$$

где V_K^- и V_A^+ – катионная и анионная вакансии.

Мы полагаем, что $T_П^-$, T_K^+ азида свинца и $П_П^-$, $П_K^+$ являются центрами формирования фотолитического металла с участием подвижных анионных вакансий (азид свинца разупорядочен по Шоттки [16])

$$T_K^0+2Va^+ \to (T_K^2Va)^{2+}+2e \to ... \to (T_KPb_n)^0,$$

$$П_K^0+2Va^+ \to (П_K^2Va)^{2+}+2e \to ... \to (П_KPb_n)^0.$$

Наблюдаемое уменьшение $V_ф$ на начальном участке кинетической кривой в процессе и после предварительного экспонирования образцов (рис. 1) подтверждает необратимый расход поверхностных центров. В процессе роста частиц фотолитического металла формируются микрогетерогенные системы азид свинца – свинец (продукт фотолиза) [13]. При воздействии на них света из области собственного поглощения азида свинца генерированные в ОПЗ азида свинца пары носителей перераспределяются в контактном поле, сформированном из-за несоответствия между термоэлектронными работами выхода азида свинца и фотолитического свинца, с переходом неравновесных дырок валентной зоны PbN_6(Ам) в свинец. Одновременно имеет место фотоэмиссия электронов из свинца в зону проводимости азида свинца. Эти процессы могут стимулировать диффузию анионных вакансий к растущим частицам

$$(T_KPb_n)^0+2Va+ \to (T_KPb_n2Va)^{2+}+2e \to (T_KPb_{n+1})^0$$

$$(П_KPb_n)^0+2Va+ \to (П_KPb_n2Va)^{2+}+2e \to (П_KPb_{n+1})^0$$

Мы полагаем, что при фотолизе гетеросистем PbN_6(Ам)–Cu_2O (также как и для PbN_6(Ам) [13]) имеет место увеличение не только размеров, но и числа частиц фотолитического свинца [12]. В итоге будут расти концентрация дырок в ОПЗ азида свинца и $V_ф$ (рис. 1, участок III). В процессе фотолиза граница раздела контактов PbN_6(Ам)–Cu_2O покрывается слоем фотолитического свинца и при больших степенях превращения фотохимические процессы в системах PbN_6(Ам)–Cu_2O будут в значительной степени определятся фотоэлектрическими процессами на границе азид – свинец (продукт фотолиза) – полупроводник. Для определения лимитирующей стадии процесса роста частиц фотолитического свинца оценили время, в течение которого подвижная анионная вакансия нейтрализует электрон или диффундирует к нейтральному центру. Время релаксации по механизму дрейфа равно максвелловскому времени релаксации [17]

$$\tau_i=\varepsilon/4\pi\sigma,$$

где ε – диэлектрическая проницаемость (ε_{PbN_6}=6), σ – удельная проводимость при 293 К ($\sigma_{PbN_6} \approx 1\cdot10^{-12}$ Ом$^{-1}\cdot$см$^{-1}$), τ_i=0,4 с. Константа скорости фотолиза при этом составит k^I=2,5 с$^{-1}$.

Время релаксации при диффузионном протекании процесса может быть оценено [17]

$$\tau_д=e^2/\sigma k_b aT,$$

где e – заряд электрона; a – постоянная решетки (a_{PbN_6}=8·10^{-10} см); T=293 К, k_b – постоянная Больцмана. При 293 К $\tau_д$=80 с. Константа скорости фотолиза (k^{II}) при этом составляет $k^{II} \approx 1{,}25\cdot10^{-2}$ с$^{-1}$.

Удовлетворительное совпадение констант скорости фотолиза (табл. 2) с k^{II} дает основание полагать, что лимитирующей стадией процесса фотолиза PbN_6(Ам)–Cu_2O является диффузия анионных вакансий к нейтральному центру.

Работа поддержана грантом Президента РФ для поддержки ведущих научных школ НШ – 20.2003.3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимов И.А., Черкасов Ю.А., Черкашин М.И. Сенсибилизированный фотоэффект. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
2. Индутный И.З., Костышин М.Т., Касярум О.П., Минько В.И., Михайловская Е.В., Романенко П.Ф. Фотостимулированные взаимодействия в структурах металл – полупроводник. – Киев: Наукова думка, 1992. – 240 с.
3. Robbilard J.J. Possible use of certain metallic azides for the development of dry photographic process // J. Photog. Science. – 1971. – V. 19. – P. 25–37.
4. Суровой Э.П.,Сирик С.М., Бугерко Л.Н. Фотолиз гетеросистем AgN_3(А) – металл // Химическая физика. – 2000. – Т. 19. – № 8. – С. 22–25.
5. Суровой Э.П., Сирик С.М., Бугерко Л.Н. Кинетика фотолиза гетеросистем азида серебра с теллуридом кадмия и оксидом меди (I) // Журнал физической химии. – 2000. – Т. 74. – № 5. – С. 927–933.
6. Суровой Э.П., Шурыгина Л.И., Бугерко Л.Н. Фотолиз гетеросистем азид таллия – металл // Химическая физика. – 2001. – Т. 20. – № 12. – С. 15–22.
7. Власов А.П., Суровой Э.П. Фотоэлектрическая чувствительность гетеросистем азид таллия – алюминий в поле излучения // Журнал физической химии. – 1991. – Т. 65. – № 6. – С. 1465–1469.
8. Суровой Э.П., Бугерко Л.Н., Расматова С.В. Фотолиз гетеросистем «азид свинца – кадмий» // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 2. – С. 95–99.
9. Суровой Э.П., Титов И.В., Бугерко Л.Н. Контактная разность потенциалов для азидов свинца, серебра и таллия // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 2. – С. 79–83.
10. Суровой Э.П., Бугерко Л.Н., Расматова С.В. Фотолиз систем «азид свинца – теллурид кадмия» // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 4. – С. 85–88.
11. Гаврищенко Ю.В. Фотолиз азидов тяжелых металлов и оптическая сенсибилизация этого процесса органическими красителями. Автореф. дис. ... канд. хим. наук. –Томск, 1969. – 20 с.
12. Суровой Э.П., Бугерко Л.Н., Захаров Ю.А., Расматова С.В. Закономерности формирования твердофазного продукта фотолиза гетеросистем азид свинца – металл // Материаловедение. – 2002. – № 9. – С. 27–33.

13. Суровой Э.П., Бугерко Л.Н., Расматова С.В. Исследование кинетических закономерностей образования продуктов в процессе фотолиза азида свинца // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 1. – С. 93–97.
14. А.с. 1325332 СССР. МКИ G01N 21/55. Устройство для измерения спектров отражения в вакууме / А.И. Турова, Г.П. Адушев, Э.П. Суровой и др. Заявлено 10.11.1985; Опубл. 24.07.1987, Бюл. № 27. – 5 с.: ил.
15. Суровой Э.П., Сирик С.М., Захаров Ю.А., Бугерко Л.Н. Фотолиз гетеросистем азид серебра – оксид меди (I) // Журн. науч. и прикл. фотографии. – 2002. – Т. 47. – № 5. – С. 19–27.
16. Захаров Ю.А., Савельев Г.Г., Шечков Г.Т. Влияние добавок Cu^{2+} и Ag^{+} на термическое разложение, электропроводность и фотопроводимость азида свинца // Известия вузов. Химия и хим. технология. – 1967. – № 11. – С. 1191–1194.
17. Мейкляр П.В. Физические процессы при образовании скрытого фотографического изображения. – М.: Наука, 1972. – 399 с.

УДК 542.883